

АННОТАЦИЯ

Поиск и последующее исследование оптических транзиентов (ОТ), связанных с космическими гамма-всплесками (GRB) и гравитационно-волновыми событиями (GW), которые регистрируют детекторы LIGO, Virgo & KAGRA - актуальная задача многоканальной астрономии. Из-за большой области локализации (1000 кв. град.) получаемой по данным космических аппаратов, работающих в жесткой области спектра и наземных лазерных интерферометров, работающих в GW-канале, а также быстрой переменности ОТ, их наблюдение на Земле стараются осуществить как можно быстрее с помощью широкоугольных обзорных телескопов малого класса (обычно до 0.5 м). Преимущества таких обзоров заключаются в быстрой скорости наведения и возможности охватить всю область локализации за несколько последовательных наведений. Вся проблема заключается в том, что в ходе обзора неба необходимо обработать огромные массивы изображений неба, выделить все объекты (>10⁴) и найти интересные ОТ. Такая задача непосильна без применения конвейеров для потоковой обработки данных, способных работать в режиме реального времени. Далее представлены результаты разработки конвейера для поиска и идентификации ОТ, в том числе диаграмма потоковой обработки на основе реализованных в настоящее время блоков конвейера. Приведены оценки точности и производительности, а также обсуждаем дальнейшие планы по разработке и улучшению конвейера, в том числе и с помощью алгоритмов машинного обучения и сверточных нейросетей.

АРХИТЕКТУРА, РЕАЛИЗАЦИЯ И ПОТОКОВАЯ ОБРАБОТКА

Конвейер представляет собой монолитный Python-модуль APEX, в котором функционал каждой задачи реализован в виде подмодулей. Присутствует поддержка плагинов, которые могут содержать в себе, например, различные алгоритмы для определенной задачи в конвейере. Настройка параметров конвейера осуществляется с помощью конфигурационного файла. Так, например, можно задать значения параметров и выбрать нужные алгоритмы в соответствии конкретным используемым телескопом. Потоковая обработка включает в себя весь цикл обработки данных до получения каталога кандидатов в транзиенты и осуществляется конвейером, согласно диаграмме на рис. 1.

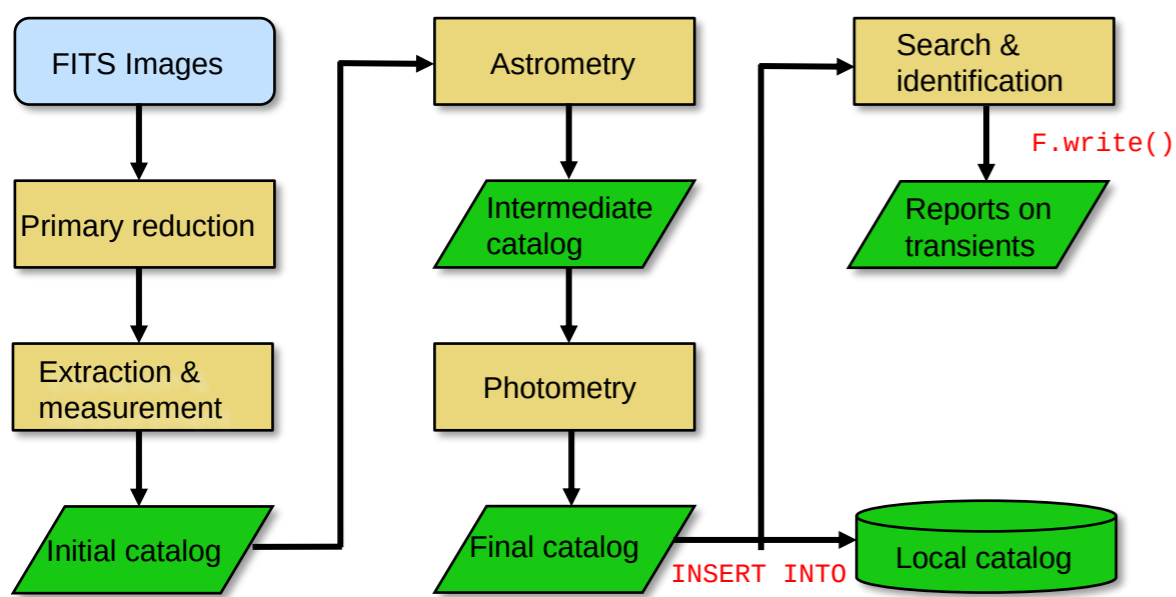


Рис.1 – Диаграмма потоковой обработки

ВЫБОР ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Выбор фотометрических стандартов (см. диаграмму на рис. 4) необходим для определения видимого блеска объектов в процессе дифференциальной фотометрии. Звезды, у которых значения стандартных параметров (сигнал/шум, цвет, переменность и др.) находятся в допустимом интервале называются фотометрическими стандартами.

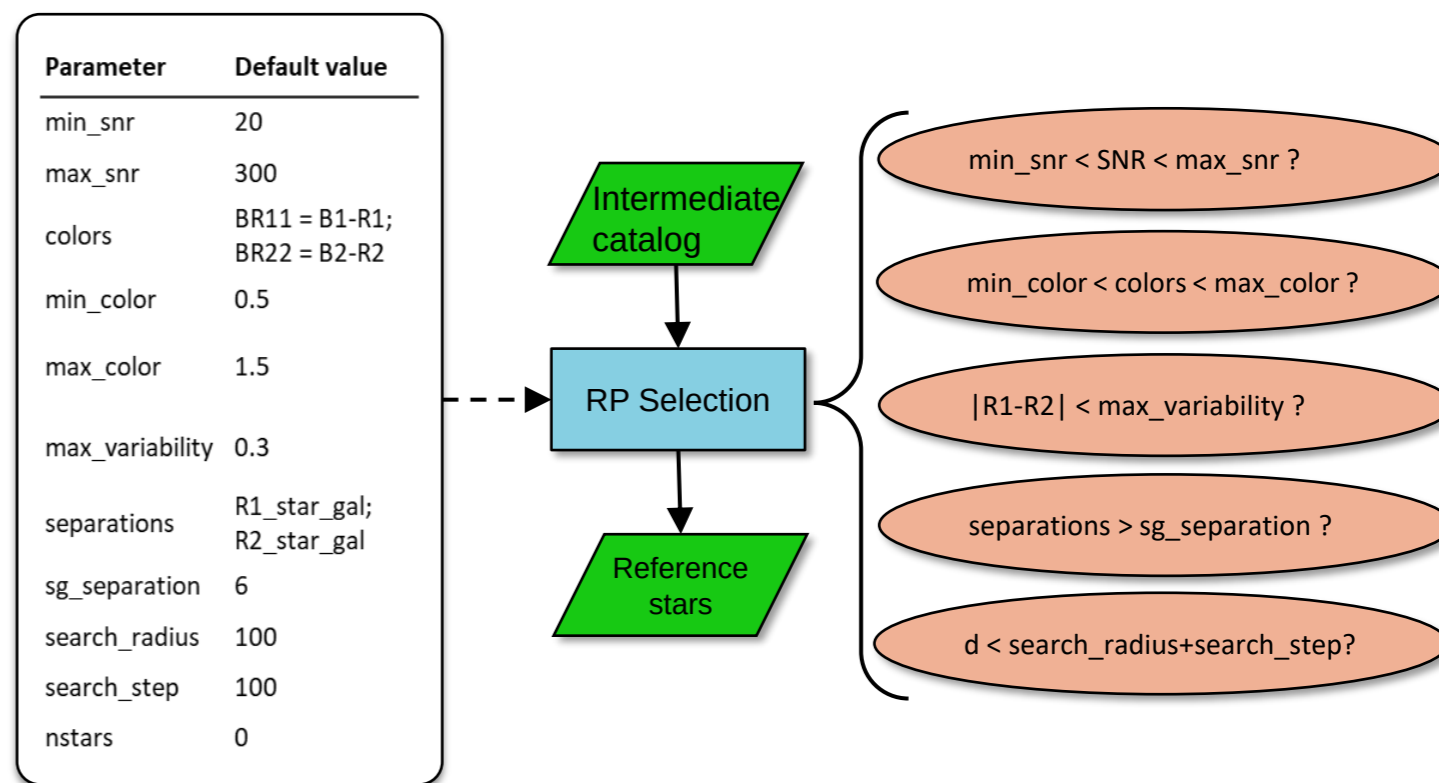


Рис.4 – Диаграмма выбора фотометрических стандартов

ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА

В процессе первичной обработки сырых .FITS изображений сначала устраняются ошибки, присущие детекторам оптического излучения (ПЗС и КМОП), такие как тепловой шум и неоднородность чувствительности (т.е. калибровка на темновые изображения и изображения плоского поля). Далее, выполняется фильтрация изображения для учета градиента фона неба, а также устранение следов от космических лучей. Затем среди откалиброванных и профильтрованных изображений удаляются те, у которых FWHM, эллиптичность объектов, уровень фона и количество выделенных объектов статистически значимо отклоняются от средних значений на протяжении серии (контроль качества). Наконец, качественные изображения комбинируются в одно, чтобы увеличить проникание (если необходимо). Все этапы первичной обработки представлены схематично на рис. 2.

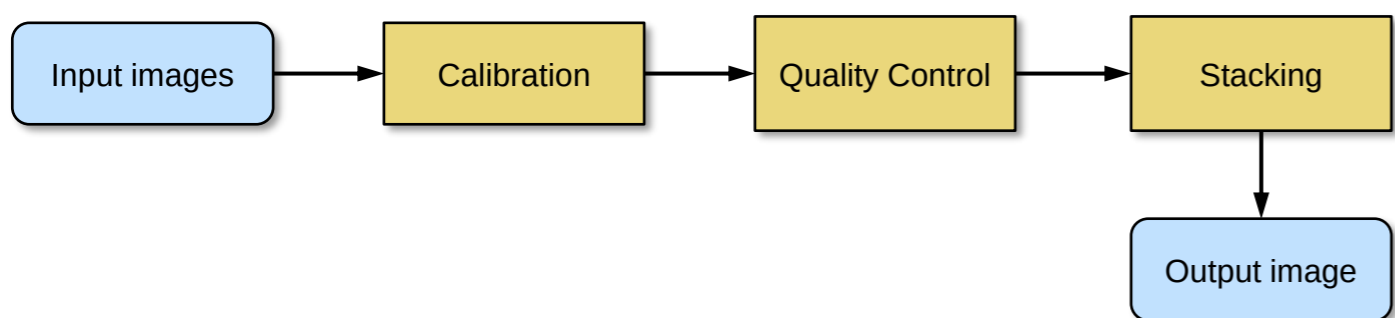


Рис.2 – Диаграмма первичной обработки

ПОИСК И ИДЕНТИФИКАЦИЯ КАНДИДАТОВ В ТРАНЗИЕНТЫ

Объекты из сформированного локального каталога, которые отсутствуют в подключенных каталогах (например, USNO-B1.0), но совпадают в пределах круговой доверительной области с транзиентами в GCN отмечаются, как кандидаты в эти транзиенты (см. рис. 5).

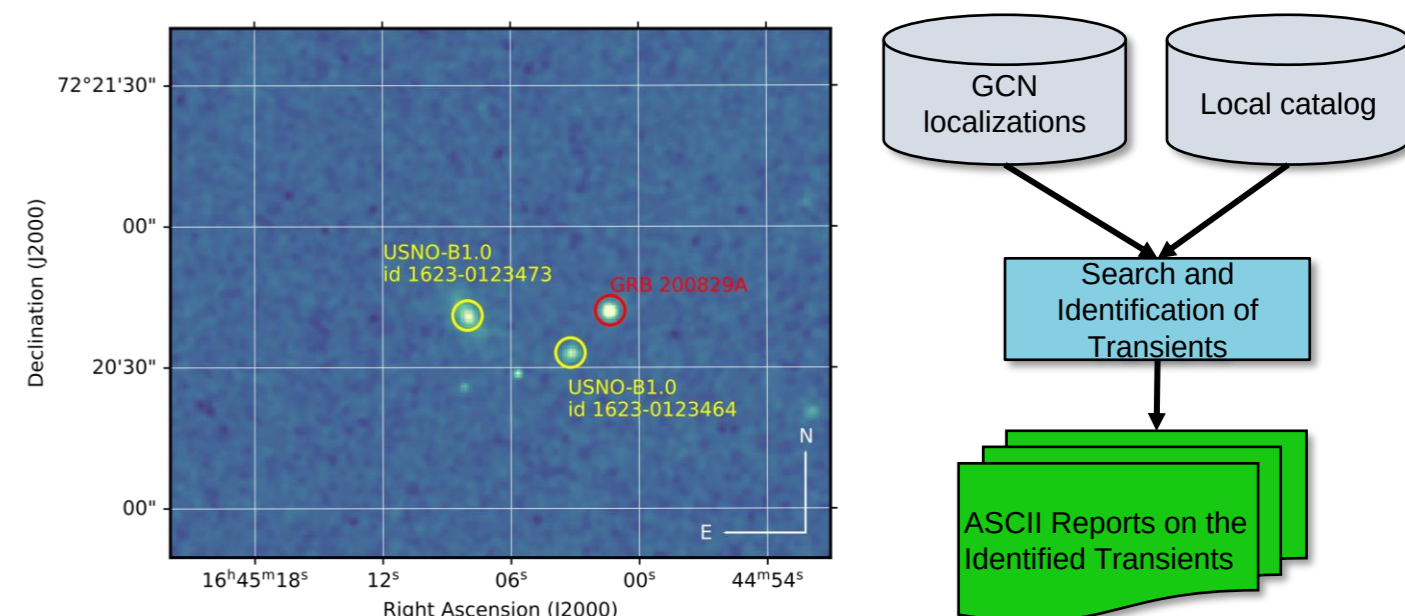


Рис.5 – Поиск и идентификация кандидатов в транзиенты (на примере GRB 200829A)

ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ И ИХ КАТАЛОГИЗАЦИЯ

Выделение объектов (см. рис. 3) осуществляется на основе пороговых алгоритмов, использующих статистику фона неба, а также свойств связности отдельных пикселей. С помощью моментов в изображениях объектов и последующей аппроксимацией модельной функцией PSF получают уточненные координаты объектов для дальнейшей астрометрии. Апертурный и PSF-поток объектов используется в дифференциальной фотометрии. Локальный каталог формируется в виде базы данных SQLite.

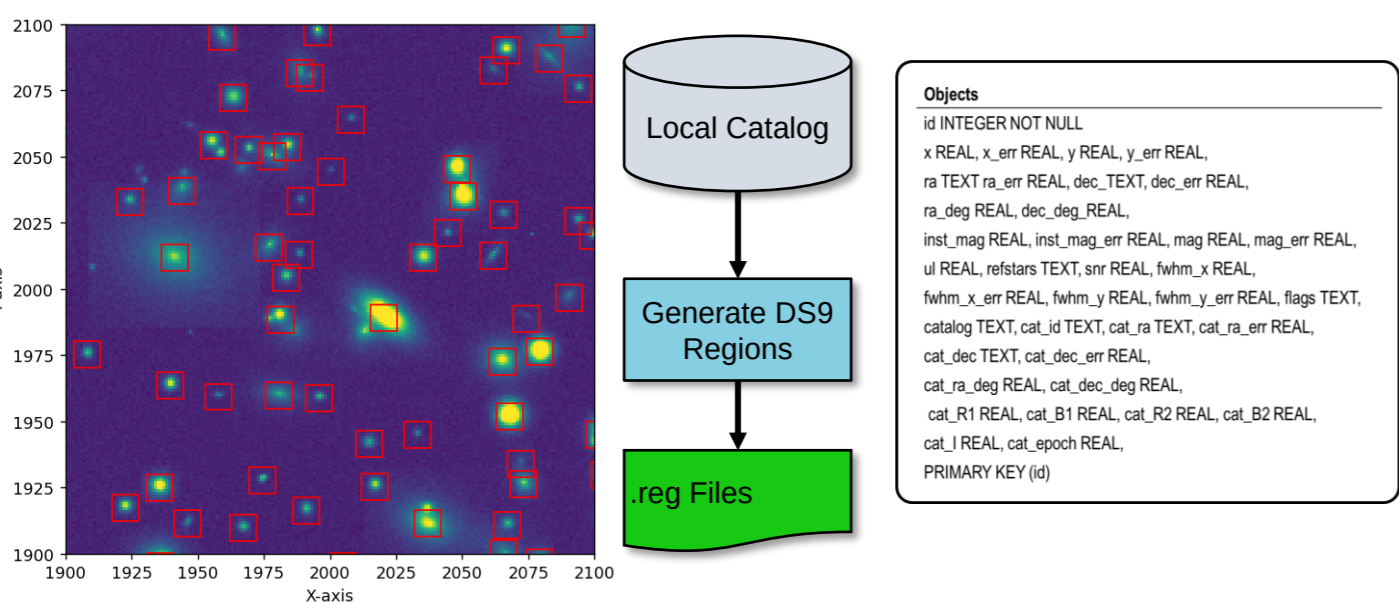


Рис.3 – Выделение объектов на изображении и каталогизация (схема таблицы объектов представлена для каталога USNO-B1.0)

ТОЧНОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

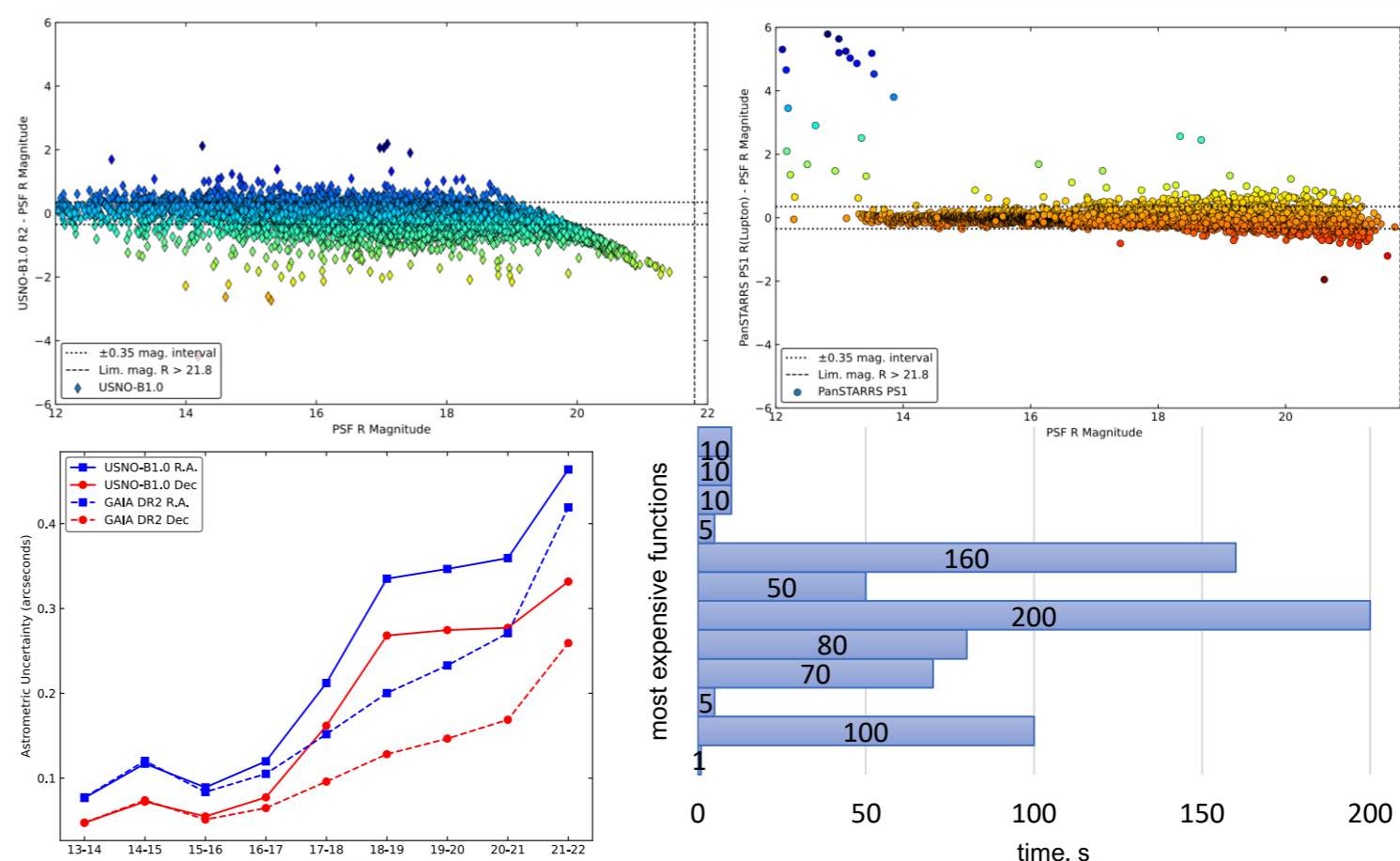


Рис.6 – Фотометрическая точность (сверху); астрометрическая точность (слева снизу); производительность справа (для 2Kx2K изображения с ~20,000 объектов)

ВЫВОДЫ И ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЛАНЫ

В ходе работы разработаны следующие блоки конвейера:

- Первичной обработки
- Выбора фотометрических стандартов
- Каталогизации объектов и их визуализации
- Поиска и идентификации транзиентов

Данные блоки используются при обработке наблюдений GRB, произведенных наблюдательной сетью ИКИ РАН.

В рамках текущей работы над конвейером ведется улучшение точности выделения и разделения объектов с помощью CNN, которая уже показывает преимущество над классическими алгоритмами; улучшение кросс-идентификации объектов методами ML с целью улучшения точности по сравнению с наиболее часто используемым методом ближайшего соседа; внедрение более точной субпиксельной апертурной фотометрии; разработка плагинов для новых локальных каталогов. Необходимо в ближайшей перспективе внедрить функционал для работы с областями локализации, представленными в виде HEALPix-карт, а также предоставляемых IPN; разработать систему управления базами данных и систему оптимального обхода неба для удаленно-управляемого телескопа. Также планируется разработка ML-метода для определения дефектов на изображении в качестве замены некоторых шагов в первичной редукции. Все это позволит уже в 2022 г. эффективно применять конвейер в цикле O4 наблюдений GW-событий LIGO, Virgo & KAGRA.